

Article, Published Version

Musall, Mark; Mahl, Lena

Numerische Modellierung von Schlitzpässen

BAWMitteilungen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107296>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Musall, Mark; Mahl, Lena (2020): Numerische Modellierung von Schlitzpässen. In: BAWMitteilungen 106. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 49-58.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Numerische Modellierung von Schlitzpässen

Dr.-Ing. Mark Musall, Karlsruher Institut für Technologie
Dr.-Ing. Lena Mahl, Bundesanstalt für Wasserbau

Im vorliegenden Artikel wird die Verwendung von mehrdimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modellen zur Untersuchung von Schlitzpässen diskutiert. Es wird erläutert, unter welchen Bedingungen eine numerische Modellierung von Schlitzpässen oder Teilen davon sinnvoll ist und wann auf schon vorhandene Kenntnisse zurückgegriffen werden kann. Wichtige Aspekte sind die Modellwahl (2D oder 3D) und die benötigte Datengrundlage. Basierend auf Literaturquellen und eigenen Erfahrungen aus Modellierungen mit FLOW-3D® und OpenFOAM® werden Hinweise gegeben, worauf bei einer Modellierung geachtet werden sollte, damit aussagekräftige Ergebnisse erzeugt werden. Dazu gehören u. a. die Wahl der Randbedingungen, der Diskretisierung und des Turbulenzmodells.

1 Einleitung

Zur Analyse hydraulisch komplexer Fragestellungen werden in der Wasserbaupraxis häufig hydrodynamisch-numerische (HN-) Modelle eingesetzt. Generell gilt es hierbei zu beachten, dass eine numerische Modellierung – vor allem in 3D – meist mit einem hohen Aufwand verbunden ist, weshalb kritisch abzuwägen ist, ob deren Notwendigkeit im konkreten Fall gegeben ist. So ist beispielsweise bei der Planung einer Fischaufstiegsanlage in Schlitzpassbauweise, welche ausschließlich aus Standard-Schlitzpassbecken gemäß gängigen Bemessungsempfehlungen besteht, keine numerische Modellierung notwendig, da hier schon weitreichende Erkenntnisse

bezüglich des Strömungsverhaltens vorhanden sind (siehe die anderen Beiträge in diesem Heft). Ein Modelleinsatz kann hingegen sinnvoll sein, wenn Becken beispielsweise deutlich von der Norm abweichen (wie etwa bei stark geknickten oder sehr langgezogenen Becken sowie Sonderbecken in Einstiegsbereichen o. ä.) oder wenn auf Basis der vorliegenden Informationen eine wesentliche Funktionsbeeinträchtigung der Anlage, z. B. im Einstau-fall, nicht ausgeschlossen werden kann.

Numerische Modelle eines Schlitzpasses können Aufschluss über unterschiedliche Zielgrößen, wie Strömungsmuster, Wasserspiegellagen, Fließgeschwindigkeiten, Anlagendurchflüsse, oder auch grundlegende Informationen zu Turbulenzgrößen geben. Somit liefern numerische Modelle oftmals eine gute Basis für die anschließende fischökologische Anlagenbewertung. Zur belastbaren Ermittlung dieser Zielgrößen sind jedoch unterschiedliche Anforderungen an das Modell zu stellen, auf welche in diesem Beitrag eingegangen wird.

Zunächst erfolgt in Abschnitt 2 eine Beschreibung der möglichen Modelltypen. Hier werden auch Hinweise zur Modellwahl in Abhängigkeit unterschiedlicher Einsatzbereiche gegeben. Anschließend wird in Abschnitt 3 aufgezeigt, welche Datengrundlagen für eine Modellierung prinzipiell geeignet sind. In den Abschnitten 4 und 5 werden weiterführende Hinweise zu 2D- und 3D-HN-Modellen gegeben. In Abschnitt 6 wird schließlich auf die Genauigkeiten eingegangen, welche von einem fachgerecht erstellten Modell erwartet werden können.

2 Grundlagen und Modellwahl

Zur detaillierten Betrachtung der Strömung in einem Schlitzpass mittels eines hydrodynamisch-numerischen Modells kommen i. A. sogenannte 2D- und 3D-Modelle in Frage. Derzeit gängige Programme zur dreidimensionalen Simulation von Strömungsvorgängen basieren meist auf der diskreten Lösung der reynoldsgemittelten Navier-Stokes-Gleichungen unter Einsatz eines numerischen Verfahrens (z. B. Finite Differenzen oder Finite Volumen) auf einem Berechnungsgitter. Die lokale Modelldiskretisierung („Auflösung“) wird dabei im Zuge der Modellerstellung insbesondere in Abhängigkeit der Fragestellung, der benötigten Zielgrößen und der Abmessungen des Untersuchungsbereichs gewählt. Die Wasseroberfläche kann i. A. durch Lösung einer zusätzlichen Volume-of-Fluid-Gleichung hinreichend genau abgebildet werden, was in den meisten gängigen Programmen standardmäßig erfolgt.

Oftmals bieten die Programme neben gängigen Methoden der statistischen Turbulenzmodellierung (RANS, z. B. $k-\epsilon$, $k-\omega$, SST) außerdem die Möglichkeit der Anwendung eines Large-Eddy-Simulationsansatzes (LES). Hier werden Wirbel ab einer bestimmten Skalengröße mitsamt ihren zeitlichen Schwankungen naturähnlich abgebildet, was insbesondere vor dem Hintergrund räumlicher und zeitlicher Schwankungen der Schlitzpassströmung von großer Bedeutung sein kann.

Zweidimensionale Modelle verwenden demgegenüber die tiefengemittelten Flachwassergleichungen, wodurch vertikale Strömungsanteile sowie ungleichförmige Verteilungen über die Gewässertiefe nicht abgebildet werden können.

Aus derzeitiger Sicht erscheint eine mehrdimensionale numerische **Modellierung** eines Schlitzpasses für folgende Fälle **nicht sinnvoll**:

- Standardfischpass gemäß gängiger Bemessungsempfehlungen,
- Vorhandensein von zufriedenstellenden Betriebserfahrungen an vergleichbaren Bestandsanlagen.

Der Einsatz von **2D-Modellen** stellt i. A. eine eher vereinfachte Betrachtung von Schlitzpässen dar. Eine 2D-Simulation kann dennoch für z. B. folgende Fälle sinnvoll sein:

- Fragestellungen, welche die Modellierung der gesamten Fischaufstiegsanlage erfordern, insbesondere falls dies im 3D-Modell nicht praktikabel ist oder die aus der 2D-Modellierung resultierenden Einschränkungen tolerabel sind,
- Fischaufstiegsanlage als Teil einer großräumigeren Modellierung (z. B. inklusive An- oder Abströmung der Fischaufstiegsanlage),
- Bewertung von Dotationen oder Einstau hinsichtlich der Wirkung auf die Hydraulik der Gesamtanlage.

3D-Modelle eignen sich hauptsächlich für Detailbetrachtungen einzelner Anlagendetails eines Schlitzpasses. Für den praktischen Einsatz erscheinen sie insbesondere sinnvoll für folgende Fragestellungen:

- Analyse von Strömungsdetails (z. B. Schlitzströmung oder Strömungsverhalten bei starkem Einstau),
- Sonder-/Wende-/Mündungsbecken mit deutlichen Abweichungen von Standardformen,
- Bewertung von Dotationen (Wirkung auf Einzelbecken),
- Evaluierung von Bestandsanlagen mit unzureichenden Monitoringergebnissen,
- Detailuntersuchungen von Ausschnitten der Fischaufstiegsanlage.

Bild 1 stellt die wesentlichen Aspekte der Modellwahl nochmals gegenüber.

Wird eine Modellierung für sinnvoll erachtet, sollte bei der Auswertung auf folgende Punkte besonders geachtet werden, damit die Aussagekraft des Modells zur Geltung kommen kann:

- Darstellung in für die Fragestellung relevanten (Detail-) Ausschnitten sowie in anschaulichen Gesamtübersichten,
- Wahl einer für die Fragestellung geeigneten Farbskala, die einen Vergleich verschiedener Varianten zulässt,
- Vollständige Beschreibung der relevanten Metadaten.

Modellierung nicht sinnvoll	2D-Modell	3D-Modell
<p>Standardfischpass</p> <p>Ausreichende Betriebserfahrungen an vergleichbaren Anlagen</p>	<p>Gesamte FAA</p> <p>Großräumiges Modell inkl. FAA</p> <p>Auswirkungen von Dotationen oder Einstau auf die gesamte FAA</p>	<p>Detailbetrachtungen von Anlagenteilen</p> <p>Analyse von Strömungsdetails, z.B. bei starkem Einstau</p> <p>Sonderbecken</p> <p>Evaluierung bei Funktionsdefiziten</p>

Bild 1: Einsatzbereiche numerischer Modelle bei Schlitzpässen

3 Datengrundlagen

Als Basis einer Modellierung werden unterschiedliche Daten zu Geometrie und hydraulischen Randbedingungen benötigt, die im Folgenden beschrieben werden.

Bei der **Modellgeometrie** eines Schlitzpasses ist zu beachten, dass auch schon kleinere geometrische Änderungen zu veränderten Strömungsbedingungen führen können. Somit ist es erforderlich, detaillierte Informationen zur Form der Einbauten sowie zur Gestaltung der Sohle und der Berandungen zu berücksichtigen. Auch Baumaterialien sowie Details der baulichen Ausgestaltung (z. B. scharfkantig oder abgerundet) können u. U. von wesentlicher Bedeutung für lokale Strömungsdetails sein. Bei der Modellierung von Bestandsanlagen sollte nach Möglichkeit zudem eine Prüfung bezüglich etwaiger Abweichungen der realen Anlage von der Planung (z. B. Ungenauigkeiten bei der Bauausführung, nachträgliche Änderungen) erfolgen.

Die Abbildung der Schlitzpassgeometrie für eine Berechnung sollte auf Basis detaillierter **CAD-Zeichnungen** erfolgen (siehe Bild 2). Eine besondere Herausforderung stellt dabei die i. A. aus Natursteinen bestehende Bau-

werkssohle eines Schlitzpasses dar. Hier können vorhandene geometrische Unregelmäßigkeiten der rauen Sohle ggf. über Zufallsverteilungen (vgl. Beispiel in Bild 2) angenähert werden. Alternativ kann die Geometrie der rauen Sohle auch vernachlässigt werden, wenn stattdessen die hydraulischen Widerstände über eine verfahrensabhängige Parametrisierung der Sohlrauheit berücksichtigt werden. Diese Möglichkeit bringt natürlich Ungenauigkeiten in der Abbildung der Hydraulik im Bereich der Sohle mit sich, jedoch zeigen Erfahrungen, dass die Strömung i. A. im Bereich der mittleren Fließtiefe ausreichend gut wiedergegeben wird (siehe auch Abschnitt 5 bzw. Beitrag von Sokoray-Varga et al. „Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen“ in diesem Heft). Die für die Widerstandsparametrisierung erforderlichen Wand- und Sohlrauheiten können auf Basis der Bau-/Sohlmaterialien über gängige Tabellenwerke abgeschätzt werden.

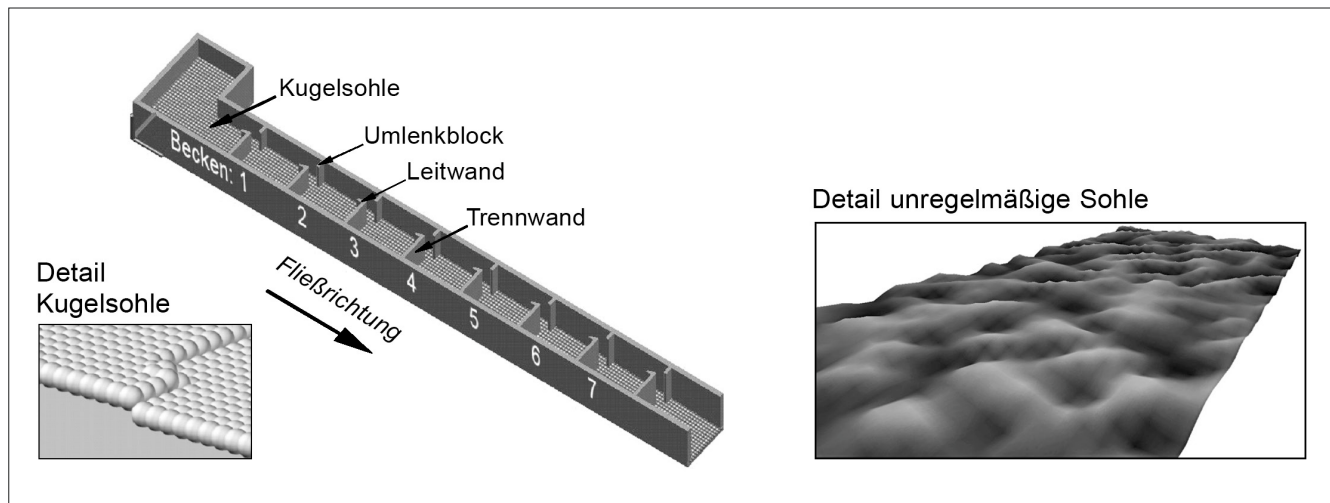


Bild 2: 3D-CAD-Modell eines Schlitzpasses mit sieben Becken und Repräsentation der Sohlrauheit mittels Kugeln (links) sowie unregelmäßige Sohle, die über eine Zufallsverteilung von Rauheitshöhen angenähert wurde (rechts)

Neben den geometrischen Anlageninformationen werden für numerische Modelle als Randbedingungen zudem **hydrologische Daten**, wie Durchfluss und Wasserstände des angrenzenden Gewässers bei unterschiedlichen Betriebszuständen (z. B. $W_{30'}$, $W_{330'}$), benötigt. Hierbei ist es wichtig, darauf zu achten, möglichst lange Zeitreihen der Daten zu verwenden und die Daten gewissenhaft zu plausibilisieren.

Soll eine **Bestandsanlage** modelliert werden oder sind die Aussagen einer Modellierung im Nachhinein zu überprüfen, sollten Messdaten für die Kalibrierung bzw. Validierung erfasst werden. Hierfür eignen sich z. B. folgende Datensätze:

- Messung der Wasserspiegellage an mindestens einem (besser zwei) Punkt(en) pro Becken,
- Visualisierung der Oberflächenströmung, z. B. über Filme oder Langzeitbelichtungen, evtl. mit Zugabe von Tracer-/Schwimmpartikeln (ggf. genehmigungspflichtig),
- Möglichst exakte Bestimmung des Anlagendurchflusses; wenn möglich inklusive Angabe eines Unsicherheitsbereichs oder einer möglichen Abflussspanne,
- Messungen der Fließgeschwindigkeit an einzelnen, fischökologisch relevanten Punkten (z. B. im Schlitz oder im Becken im Bereich des Geschwindigkeitsminimums der Hauptströmung zwischen den Schlitzzen),
- Plausibilisierung der geometrischen Eingangsdaten der Modellierung (Beckenabmessungen, Schlitzweiten, Sohlhöhen, Oberflächenrauheiten).

Besteht darüber hinaus die Möglichkeit der Durchführung einer aufwändigeren Messkampagne, wird insbesondere die Erfassung des detaillierten Strömungsbildes in (ausgewählten) Einzelbecken in Form von Vielpunktmessungen, z. B. in einer Tiefenebene, empfohlen. Über 20 bis 25 flächig verteilte Messpunkte (Messpunktstand entspricht ungefähr der Schlitzweite) kann z. B. die Strömungscharakteristik eines Beckens bereits derart detailliert abgebildet werden, dass darauf aufbauend weitergehende Aussagen zur Prognosegüte des numerischen Modells ermöglicht werden. Insbesondere hier ist jedoch die Wirtschaftlichkeit zu beachten.

4 Hinweise zu 2D-Modellen

Unterschiedliche Untersuchungen zeigen, dass die vertikale Komponente der Geschwindigkeit in vielen Bereichen des Schlitzpasses im Vergleich zu den horizontalen Komponenten sehr gering ist, weshalb die dortige Strömung als quasi-2D-Strömung betrachtet werden kann (Rajaratman et al. 1992, Puertas et al. 2004, Pena et al. 2004, Sokoray-Varga et al. „Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen“ in diesem Heft). Signifikante Vertikalströmungen treten i. A. nur im unmittelbaren Nahbereich des Schlitzes auf. Die naheliegende Möglichkeit, einen Schlitzpass mit Hilfe eines 2D-tiefengemittelten Modells zu modellieren, wurde deshalb von unterschiedlichen Autoren (z. B. Cea et al. 2007,

Chorda et al. 2010, Bombac et al. 2014, Bombac et al. 2015) untersucht. Die Untersuchungen bestätigen die prinzipielle Verwendbarkeit eines 2D-tiefengemittelten Modells zur Modellierung eines Standardschlitzpasses, wobei keine Aussagen zu Sonderbecken o. ä. gemacht werden. Cea et al. (2007) empfehlen bei sehr steilem Gefälle ($> 10\%$) des Schlitzpasses jedoch eine Überprüfung dieser Annahme. Im Folgenden werden im Wesentlichen die Erkenntnisse der genannten Untersuchungen zusammengefasst.

Praxisrelevante Ergebnisdaten zweidimensionaler Modelle von Schlitzpässen stellen die tiefengemittelten Geschwindigkeiten sowie Wasserstände dar, welche von 2D-Modellen i. A. ausreichend genau abgebildet werden. Turbulenzparameter hingegen werden, wenn überhaupt, weniger genau abgebildet. Hinsichtlich der Schwankungen der Hauptströmungspfade sowie lokaler Details im Schlitzbereich (z. B. Ablösungen, Maximalgeschwindigkeiten) sind beim Einsatz von 2D-Modellen eher keine bzw. nur eingeschränkt zufriedenstellende Ergebnisse zu erwarten.

Wesentlich für realistische Modellergebnisse ist das Setzen plausibler **Randbedingungen**. Als Randbedingungen werden in den meisten Fällen am oberen Modellrand erwartete Anlagendurchflüsse (vgl. Beitrag von Sokoray-Varga et al. „Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen“ in diesem Heft) und am unteren Modellrand relevante Wasserstände angesetzt.

Um möglichst gute Ergebnisse zu erreichen, sollten einige nachfolgend genannte Aspekte bei der 2D-Modellierung beachtet werden:

- Nach Möglichkeit sollte ein **numerisches Schema** zweiter Ordnung verwendet werden, da bei Schemata erster Ordnung u. U. eine sehr hohe numerische Diffusion auftreten kann und z. B. die mittleren Geschwindigkeiten nicht ausreichend detailliert abgebildet werden (Cea et al. 2007).
- Gute Ergebnisse sind nur bei ausreichend feinen **Gitterauflösungen**, z. B. zwischen 1 cm und 5 cm bezogen auf Anlagen mit Beckenlängen von ca. 3 m, zu erwarten (Chorda et al. 2010, Bombac et al. 2014). Sollte ein numerisches Schema erster Ordnung verwendet werden, ist hierauf besonders zu achten. Es wird dringend empfohlen, die für die jeweilige Fragestellung benötigte Gitterauflösung mittels Sensitivi-

tätsstudien zu prüfen und deren Ergebnisse nachvollziehbar zu dokumentieren.

- Verlässliche Ergebnisse sind i. A. nur bei Verwendung eines geeigneten **Turbulenzmodells** zu erwarten. In den betrachteten Studien ergaben sich mit dem k- ϵ -Modell gute Ergebnisse. Modelle mit konstanter Wirbelviskosität und Nullgleichungsmodelle scheinen hingegen nicht ausreichend genaue Ergebnisse zu liefern (Cea et al. 2007, Bombac et al. 2014), es sei denn, die dabei benötigten Parameter konnten über ein komplexeres Modell kalibriert werden.
- Die hier zitierten Studien (Cea et al. 2007, Bombac et al. 2014) wie auch eigene Erfahrungen zeigen, dass der **Rauheitsbeiwert** (z. B. Manning-Strickler) nur einen geringfügigen Einfluss hat.

5 Hinweise zu 3D-Modellen

Nachfolgend werden Hinweise zu einzelnen Aspekten der 3D-HN Modellierung gegeben und wesentliche Modellsensitivitäten diskutiert. Die Erkenntnisse basieren auf unterschiedlichen Untersuchungen unter Einsatz der Softwaresysteme FLOW-3D® und OpenFOAM® zu realisierten Schlitzpässen sowie Schlitzpässen im Modellmaßstab und Sonderbeckenanalysen, deren Hintergründe hier jedoch nicht im Detail erläutert werden können. Im Folgenden werden die wesentlichen bei diesen Untersuchungen gemachten Erfahrungen zusammengefasst.

Randbedingungen

Auch bei 3D-Modellen ist das Setzen plausibler Randbedingungen ein wichtiger Schritt. I. A. wird bei der Simulation von Schlitzpässen am oberstromigen Modellrand der Durchfluss und am unteren Modellrand ein Wasserstand vorgegeben. Der oberstromige Wasserstand stellt sich dann entsprechend im Modell ein. Alternativ kann am oberen Modellrand statt des Durchflusses ein zweiter Wasserstand definiert werden; in diesem Fall stellt sich der Durchfluss ein. Bei dieser Variante besteht auch die Möglichkeit, den Wasserstand an einem zusätzlichen Rand (z. B. seitlich) zu definieren und in Verbindung mit einer etwas überhöhten Durchflusszugabe eine Abflussaufteilung oberhalb des Schlitzpasses und damit das selbstständige Einstellen der Durchflussmenge im Schlitzpass

zu ermöglichen. Eine solche Situation entspricht vom Prinzip her dem Naturzustand an einer Gesamtanlage, wo in der Regel auch der Oberwasserstand, z. B. über eine Stauregulierung, fixiert ist.

Die explizite Vorgabe realistischer Verteilungen weiterer Strömungsgrößen (z. B. turbulente kinetische Energie) an den Modellrändern hat sich bei reinen Schlitzpassberechnungen als nicht notwendig herausgestellt, da keine Beeinflussung der Strömung im Schlitzpass beobachtet werden konnte, sobald der für die Auswertung relevante Modellbereich durch mindestens einen Schlitz vom Einlassrand getrennt ist. Die Hydraulik im Schlitzbereich bestimmt hierbei die Turbulenzentwicklung nahezu vollständig. Liegt bei einer Modellierung kein Schlitz zwischen dem oberen Rand und dem für die Auswertung relevanten Gebiet, sollten jedoch ein ausreichend großer Abstand zum Rand eingehalten und plausible Werte für die turbulente kinetische Energie abgeschätzt werden (siehe z. B. CFD-Online 2019), da anderenfalls eine Beeinflussung nicht völlig ausgeschlossen werden kann.

Kann es bei einer Anlage zu Rückstau bei erhöhter Wasserführung im Unterwasser kommen, sind Sensitivitätsanalysen bezüglich aller im Untersuchungsspektrum vorkommenden unterstromigen Wasserstände wichtig, um Auswirkungen auf die Strömungsgrößen in der Anlage zu ermitteln (siehe Bild 3).

Diskretisierung

Bei der Auswahl der geeigneten Modelldiskretisierung sind die Zielgrößen der Untersuchung von wesentlicher Bedeutung. Ist lediglich die generelle Strömungscharakteristik (Strömungsmuster, Hauptfließkorridor, Rückströmzonen) von Interesse, kann eine relativ grobe Diskretisierung (ca. 5 bis 10 Zellen über die Schlitzbreite) ausreichen. Hiermit konnte bei vorliegenden Untersuchungen mit FLOW-3D® die Bildung unterschiedlicher Strömungsmuster an der Oberfläche zufriedenstellend nachgebildet werden. Die Wahl einer solchen gröberen Diskretisierung setzt jedoch eine Sensitivitätsprüfung mittels feinerer Diskretisierung voraus. Sind dagegen Strömungsdetails – wie lokale Ablösungen oder maximale Fließgeschwindigkeiten – gesucht, ist eine deutlich feinere Modellauflösung erforderlich. Mehrere Untersuchungen zeigten hier erst bei einer Zellauflösung von ca. 20 Zellen über die Schlitzbreite zufriedenstellende Ergebnisse (Beispiel siehe Bild 4). Besteht verfahrensintern die Möglichkeit variabler Gitterabstände, kann im Becken selbst eine gröbere Diskretisierung ausreichend sein und nur der Schlitzbereich feiner aufgelöst werden. Insbesondere hier sind jedoch Sensitivitätsanalysen zu den Auswirkungen durchzuführen. Insgesamt können die genannten Werte der Modelldiskretisierung jedoch nur erste Anhaltswerte darstellen. Eine eingehende Sensitivitätsprüfung bzgl. der Auswirkungen unterschiedlicher Diskretisierungen sollte essentieller Bestandteil jeder Simulation von Fischaufstiegsanlagen sein. In jedem Fall sind die Berechnungszellen so zu wählen, dass die Abbildung der Geometrie in ausreichender Genauigkeit möglich ist. Hierfür kann es auch sinnvoll sein, die wandnahen Zellen zu verfeinern.

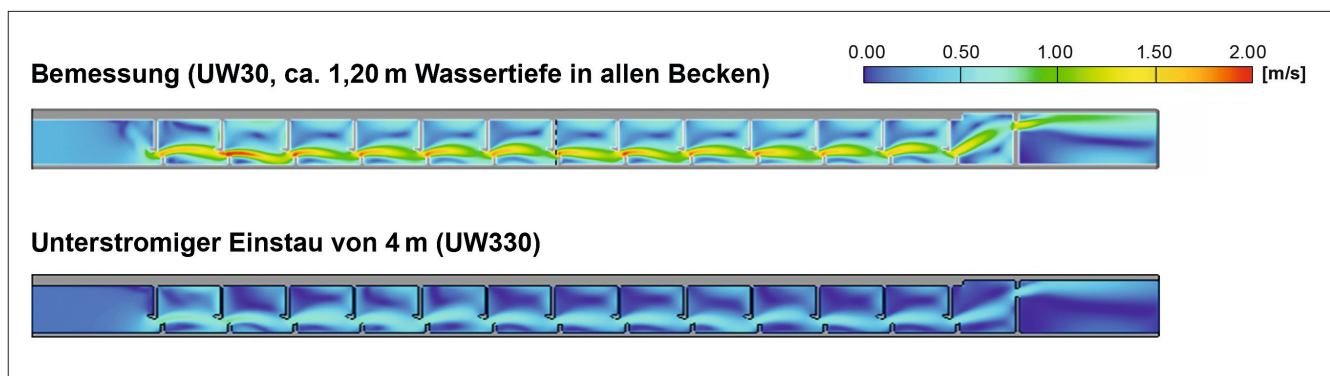


Bild 3: Modellierung einer Fischaufstiegsanlage ohne (oben) und mit (unten) Rückstau; die veränderten Fließgeschwindigkeiten sind deutlich zu erkennen

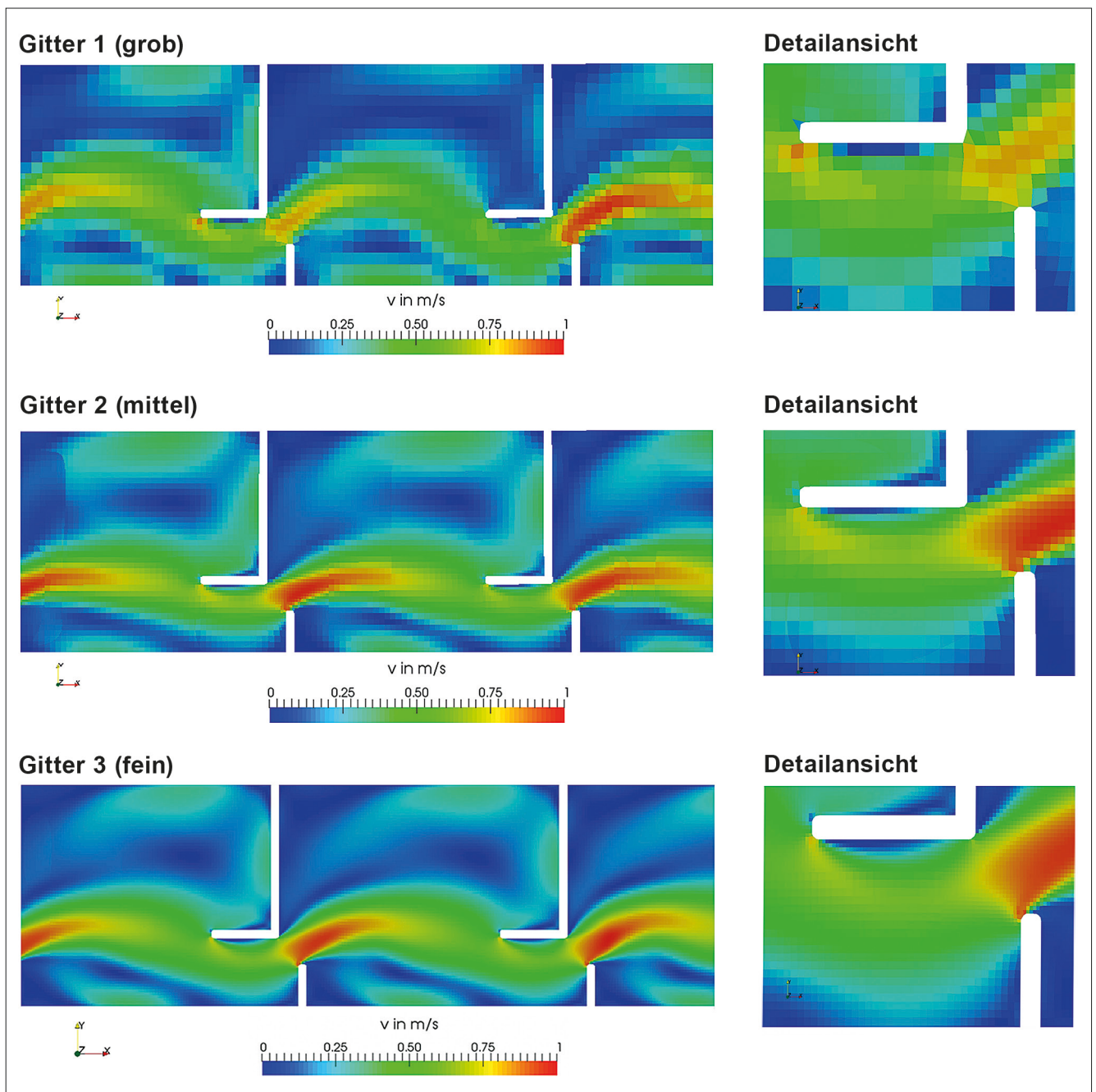


Bild 4: Beispiel für Effekte verschiedener Gitterauflösungen im Schlitz einer Fischaufstiegsanlage: Gitter 1: ca. 6 Zellen im Schlitz, Gitter 2: ca. 12 Zellen im Schlitz, Gitter 3: ca. 24 Zellen im Schlitz (Boldt 2014)

Turbulenzmodellierung

Sehr wichtig für eine plausible Modellierung ist die Wahl eines geeigneten Turbulenzmodells. Wie in Abschnitt 2 beschrieben, werden für 3D-Modelle meist statistische RANS-Modelle verwendet. Es hat sich diesbezüglich gezeigt, dass nur die komplexeren Zweigleichungsmodelle eine ausreichende Genauigkeit für die realistische Abbildung der Strömungseffekte in Schlitzpässen besitzen.

Statistische Modelle können durch die ihnen zugrunde liegenden Vereinfachungen prinzipiell keine hochfrequenten turbulenten Schwankungen, sondern nur vergleichsweise langsam ablaufende Veränderungen des gesamten Strömungsbilds abbilden. Bei ausreichend hoher Modelldiskretisierung zeigen sie jedoch auch bei Schlitzpässen oftmals zufriedenstellende Ergebnisse bezüglich der Prognose der mittleren bzw. einer nur gering schwankenden Strömung.

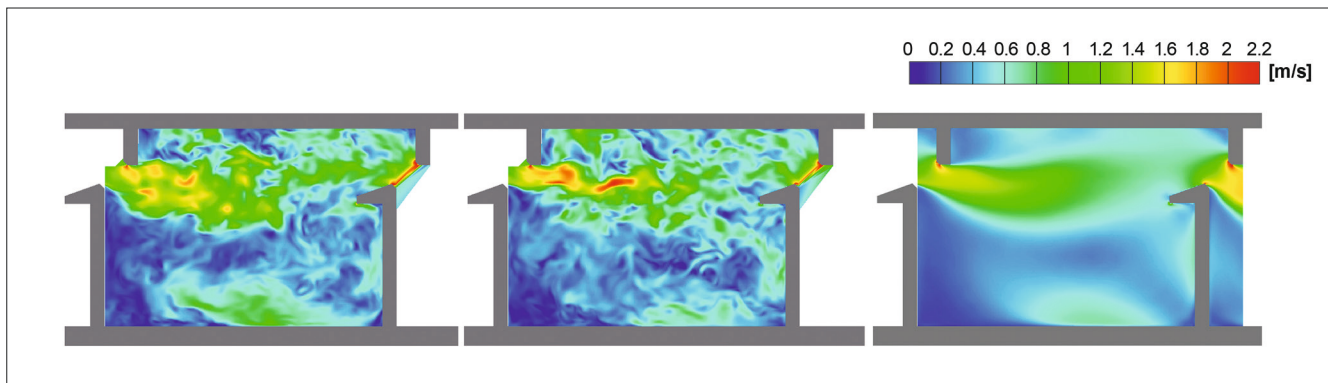


Bild 5: Geschwindigkeitsverteilung zu unterschiedlichen Zeitpunkten einer LES-Simulation (links und Mitte) und gemitteltes Ergebnis einer 300s-Simulation (rechts)

Da es sich bei Schlitzpassströmungen in der Regel jedoch um hochturbulente Strömungen handelt, kann die oftmals vorhandene Option der LES-Berechnung in vielen Fällen weitergehende Einblicke in das in der Natur zu erwartende Strömungsbild bieten (Fuentes-Pérez et al. 2018, Oberle et al. 2012; siehe auch Bild 5). Dies gilt insbesondere im Fall von unterstromigem Einstau oder bei Beckengeometrien, welche zu Strömungsmustern im Übergangsbereich (Transition) führen. Jedoch gelten für LES strengere Anforderungen an die Modellqualität, insbesondere an die Gitterauflösung, welche in jedem Fall getestet werden müssen. Generell kann die Option der LES-Berechnung bei ausreichend feiner Gitterauflösung auch als eine Art „Hydraulik-Test“ zur Überprüfung der Ergebnisse der statistischen Turbulenzmodellierung zum Einsatz kommen. Dabei sollten die statistischen Modellierungsergebnisse weitgehend den zeitlichen Mittelwerten der LES entsprechen.

Wand-/Sohlerfassung

Für viele Fragestellungen ist es ausreichend, Sohle und Wände als eine ebene Berandung mit einer Wandfunktion mit einer geeigneten Abschätzung der Rauigkeit (z. B. k_s -Wert) anzunehmen, da so die Geschwindigkeiten im Becken ausreichend genau abgebildet werden können. Belastbare Aussagen zu den Strömungsgrößen in direkter Wand- oder Sohlennähe sind mit einem solchen Modell jedoch nicht möglich.

Berechnungsdauer/Datenausgabe

Bei Einsatz statistischer Turbulenzmodellierung sollte die Simulationszeit so gewählt werden, dass einerseits eine Unabhängigkeit von den Initialbedingungen ge-

währleistet ist und andererseits weitgehende Stationarität in relevanten Strömungsgrößen erreicht wird. Pauschale Aussagen zu Simulationszeiten sind hier nicht möglich, da diese stark von der betrachteten Situation und Fragestellung abhängen. Diesbezüglich sollten bei jeder Simulation an unterschiedlichen Stellen über die Auswertung berechneter Zeitreihen Analysen durchgeführt werden. Werden verbleibende (kleinere) Schwankungen in den Strömungsgrößen beobachtet, können diese ggf. über einen ausreichend großen Zeitraum gemittelt werden.

6 Modellgenauigkeiten

Ein Modell ist immer ein abstrahiertes Abbild der Realität und wird diese nie exakt wiedergeben können. Nachfolgende Auflistung soll Anhaltswerte dafür liefern, welche Prognosegenauigkeiten für einige wesentliche Zielgrößen einer Schlitzpasssimulation unter Einsatz eines 3D-Verfahrens in der Praxis erzielt werden können. Da derartige pauschale Angaben auch bei Vorliegen entsprechend umfangreicher Erfahrungswerte mit sehr großen Unsicherheiten behaftet sind, sollten sie mit entsprechender Vorsicht betrachtet werden. Wichtig ist hier auch zu beachten, dass die Unsicherheiten meist stark von der gewählten Gitterauflösung abhängen.

Bei **Fließgeschwindigkeiten** im Bereich der Hauptfließpfade sind numerisch begründete Prognoseunsicherheiten in einer Größenordnung von bis zu ca. $\pm 5\%$ bis 15% zu erwarten. Die Prognose von Fließgeschwindigkeiten im Scherbereich bzw. in den Rückströmzonen oder Be-

reichen mit sehr geringen Geschwindigkeiten ist mit größeren Unsicherheiten behaftet, da hier schon eine geringe Verschiebung des Hauptströmungspfades zu großen Abweichungen führen kann. Der Wertebereich der natürlichen Schwankungen hingegen kann z. B. mittels einer LES i. A. in weitgehend realistischer Größenordnung abgebildet werden.

Der **Anlagendurchfluss** wird abhängig vom Verfahren mit Unsicherheiten von bis zu ca. $\pm 15\%$ abgebildet. Mittels Modelloptimierungen basierend auf Sensitivitätsprüfungen (z. B. Diskretisierung, Geometrieabbildung) kann dieser Wert oftmals deutlich reduziert werden.

Wasserstände innerhalb der Anlage können bei Unsicherheiten hinsichtlich der exakten Durchflussabbildung u. U. nur bei zusätzlicher oberstromiger Fixierung des Wasserspiegels anhand der Planungswerte belastbar abgebildet werden. Dann sind jedoch Genauigkeiten von wenigen Zentimetern ($\pm 1\text{ cm}$ bis 2 cm), auch bezüglich der Schwankungswerte, zu erwarten. Die Gitterauflösung im Bereich der Wasseroberfläche kann hier zusätzlich ein entscheidender Aspekt sein.

Die **Strömungscharakteristik** bzw. die **Strömungsmuster** werden bei geeigneter Modelldiskretisierung i. A. naturgetreu abgebildet. Auch eventuelle Schwankungsbereiche können ausreichend genau erfasst werden.

7 Schlussfolgerungen

Der Vergleich vorhandener Ergebnisse aus numerischen Modellen mit Naturmessungen an bestehenden Anlagen wie auch mit Ergebnissen aus gegenständlichen Modelluntersuchungen zeigt die grundsätzliche Eignung der numerischen Modelle zur Berechnung und Analyse von Strömungsvorgängen in Schlitzpässen.

Numerische Modelle können bei der Planung wie auch bei der hydraulischen Funktionskontrolle von Fischwanderhilfen in Schlitzpassbauweise ein wertvolles Werkzeug darstellen. Mittels hydrodynamisch-numerischer Modellierung können alle gängigen hydraulischen Bemessungsgrößen ermittelt und wesentliche Sensitivitäten überprüft werden.

Generell gilt es jedoch, die prinzipielle Notwendigkeit des Modelleinsatzes kritisch zu hinterfragen sowie den erwarteten Erkenntnisgewinn im Vorfeld klar zu definieren. Fällt die Entscheidung dann zugunsten einer numerischen Modellierung, kann die Beachtung der in den vorangegangenen Abschnitten gegebenen Hinweise von entscheidender Bedeutung für die Ergebnisqualität sein. Darüber hinaus sollte bei allen Beteiligten eine realistische Einschätzung der zu erwartenden Prognosegüte bzw. eventueller Modellunsicherheiten gewährleistet sein.

8 Literatur

Boldt, S. (2014): Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse einer 3D-numerischen Modellierung einer idealisierten Fischeufstiegsanlage in Schlitzpassbauweise. Bachelorarbeit am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), unveröffentlicht.

Bombac, M.; Novak, G.; Rodic, P.; Cetina, M. (2014): Numerical and physical model study of a vertical slot fishway. In: Journal of Hydrol. Hydromech. 62 (2), pp. 1-10.

Bombac, M.; Novak, G.; Mlacnik, J.; Cetina, M. (2015): Extensive field measurements of flow in vertical slot fishway as data for validation of numerical simulations. In: Journal of Ecological Engineering 84, pp. 476-484.

Cea, L.; Pena, L.; Puertas, J.; Vazquez-Cendon, M. E.; Pena, E. (2007): Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. In: J. Hydraulic Eng., 133, 2, pp. 160-172.

CFD-Online (2019): Turbulence free-stream boundary conditions. Online verfügbar unter https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_free-stream_boundary_conditions (zuletzt geprüft am 06.03.2020).

Chorda, J.; Maubourguet, M. M.; Roux, H.; George, J.; Larnier, M.; Tarrade, L.; David, L. (2010): Two-dimensional free surface flow numerical model for vertical slot fishways. In: Journal of Hydraulic Research 48 (2), pp. 141-151.

Fuentes-Pérez, J. F.; Silva, A. T.; Tuhtan, J. A.; García-Vega, A.; Carbonell-Baeza, R.; Musall, M.; Kruusmaa, M. (2018). 3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways. *Environmental Modelling & Software*, 99, pp. 156–169. [10.1016/j.envsoft.2017.09.011](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.011).

Musall, M.; Oberle, P.; Carbonell Baeza, R.; Nestmann, F.; Fuentes-Pérez, J. F.; Tuhtan, J. (2015): Beitrag zu detaillierten Analysen der Hydraulik von Schlitzpässen, *Wasserwirtschaft* 08/2015, S. 67-72. DOI:10.1007/s35147-015-0551-x.

Oberle, P.; Musall, M.; Riesterer, J.; Nestmann, F. (2012): Numerische Modelluntersuchungen im Rahmen der Planung der Fischaufstiegsanlage Geesthacht, *Wasserwirtschaft* 04/2012; 102(4), S. 28-33.

Pena, L.; Cea, L.; Puertas, J. (2004): Turbulent flow: An experimental analysis in vertical slot fishways. In: 5th Int. Symp. on Ecohydraulics, Madrid, Spanien, IAHR, Madrid, Spanien, pp. 881-888.

Puertas, J.; Pena, L.; Teijeiro, T. (2004): Experimental Approach to the Hydraulics of Vertical Slot Fishways. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 130, pp. 10-23.

Rajaratnam, N.; Katopodis, C.; Solanki, S. (1992): New designs for vertical slot fishways, *Canadian Journal of Civil Engineering* 19, pp. 402-414.

Sokoray-Varga B.; Kerlin, T.; Prinz, F.; von Meltzer, J.; Musall, M.; Oberle, P.; Weichert, R. (2020): Der Einfluss von Sohl- und Wandrauheit auf die Hydraulik von Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 43-48.

Sokoray-Varga, B.; Höger, V.; von Meltzer, J.; Prinz, F.; Weichert, R. (2020): Durchfluss-Fließtiefen-Relation in Schlitzpässen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 106, Karlsruhe: BAW, S. 33-42.